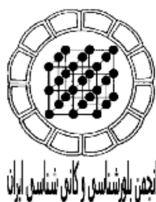
مجله بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران

مقاله پژوهشی

سال سی ام، شمارهٔ چهارم، زمستان ۱۴۰۱، از صفحهٔ ۶۹۷ تا ۷۱۲



شواهد کانی‌سازی مس-طلای پورفیری در منطقه اکتشافی زرد کوه، جنوب‌شرق ایرانشهر

حسین رستم‌پور مقدم بگلر[۱]، آزاده ملکزاده شفارودی[۲*]، سعید سعادت[۳]

۱- گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد

۲- گروه زمین‌شناسی و گروه پژوهشی اکتشاف ذخایر معدنی شرق ایران، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد

۳- گروه زمین‌شناسی و مهندسی نفت، واحد مشهد، دانشگاه آزاد اسلامی، مشهد، ایران

(دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۲/۲۴، نسخه نهایی: ۱۴۰۱/۴/۴)

چکیده: منطقه اکتشافی زردکوه در استان سیستان و بلوچستان و در جنوب‌شرق ایرانشهر قراردارد. این منطقه در مرز حوضه پیش-کمانی مکران با پهنه فلیش شرق ایران واقع است. زمین‌شناسی منطقه بیشتر شامل سنگ‌های آتشفشانی-رسوبی کرتاسه پسین بوده که توده پیروکسن‌دیوریتی تا مونزودیوریتی در آن‌ها نفوذ کرده است. توده دیوریتی دربردارنده رگچه‌های کوارتز- سولفید فراوان با سیمای به شدت دگرسان شده است. کانی‌سازی در این منطقه بیشتر همراه با دگرسانی‌های سیلیسی و آرژیلیک همراه با پهنه گسترده گوسان دیده می‌شود که با دگرسانی پروپلیتیک دربرگرفته شده‌است. کانی‌های اولیه پیریت و کالکوپیریت و کانی‌های ثانویه شامل گوتیت، هماتیت، لیمونیت، ژاروسیت، کالکوسیت، کوولیت، مالاکیت و آزوریت هستند که در قالب بافت رگچه‌ای، افشان، گل کلمی و جانشینی دیده می‌شود. بیشترین مقدار طلا ۱٫۱ گرم بر تن، مس ۵ درصد، نقره ۴ گرم در تن، آرسنیک بیش از ۱۰۰ گرم برتن و روی ۷۵۹ گرم برتن اندازه‌گیری شده است. بررسی سیال‌های درگیر در کانی کوارتز نشان می‌دهد که دمای همگن‌شدگی سیال‌های درگیر بین ۱۸۸ تا ۳۶۵ درجه‌ی سانتی‌گراد و مقدار شوری از ۱۴٫۵ تا ۱۸٫۲ درصد وزنی متغیر است. داده‌های دما و شوری نقش فرآیند آمیختگی سیال با دما و شوری بالا به (احتمال بسیار ماگمایی) را با سیال‌های جوی با دما و شوری پایین‌تر را در تشکیل ذخیره معدنی نشان می‌دهد. نوع دگرسانی و گسترش آن، بی‌هنجاری‌های زمین شیمیایی، گستره دما و شوری، موقعیت زمین‌شناسی، سنگ‌شناسی و کانی‌شناسی نشان می‌دهد که کانی‌سازی منطقه اکتشافی زردکوه می‌تواند نشانگر بخش پسین یک سامانه از نوع مس- طلا پورفیری باشد.

واژه‌های کلیدی: *کانی‌سازی؛ زمین شیمی؛ سیال‌های درگیر؛ مس- طلا؛ پورفیری؛ زردکوه؛ ایرانشهر.*

مقدمه

منطقه اکتشافی زردکوه در استان سیستان و بلوچستان و در ۳۰ کیلومتری جنوب‌شرقی شهرستان ایرانشهر در مرز بین مختصات "۲۶°۵۷'۲۸ تا "۲۶°۵۶'۵۷ عرض‌های شمالی و "۶۰°۴۷'۲۵ تا "۶۰°۴۸'۰۱ طول‌های شرقی واقع است. این منطقه در مرز حوضه پیش‌کمانی مکران با پهنه فلیش ایران قرار دارد [۱]. دلخواه [۲] سنگ‌های نفوذی منطقه زردکوه را ترکیبی از گرانیت، دیوریت و سینیت اغلب دگرسان شده و سنگ‌های آذرین خروجی با ترکیب سنگ‌شناسی غالب آندزیتی و به طور محدود بازالتی معرفی کرده است. تاریخچه تکوین زمین‌شناسی و عملکرد رخدادها و فرآیندهای مختلف زمین-شناسی موجب پدیده‌های متنوع و مناسب معدن‌زایی در استان سیستان و بلوچستان شده‌اند. انواع گوناگونی از محیط‌های زمین‌شناسی، محیط‌های اقیانوسی (مجموعه افیولیتی)، محیط-های رسوبی و فعالیت‌های ماگمایی به ویژه قوس‌های آتشفشانی کرانه قاره‌ای وجود دارد که اغلب با تمرکز گروه‌های مختلفی از ذخایر معدنی فلزی و غیرفلزی همراه هستند که در صورت شناسایی، پی‌جویی و بهره‌برداری می‌توانند در پیشرفت استان

*نویسنده مسئول، تلفن: ۰۹۱۵۱۱۹۲۱۳۲، نمابر: ۸۷۹۷۲۷۵-۰۵۱۳، پست الکترونیکی: shafaroudi@um.ac.ir

[DOR: 20.1001.1.17263689.1401.30.4.9.9]

[DOI: 10.52547/ijcm.30.4.697]

نقش اساسی داشته باشد. بررسی‌های فلززایی انجام شده در استان سیستان و بلوچستان (طرح توسعه محور شرق) با نظارت استانداری (۱۳۷۷) مشخص نمود که استان پتانسیل‌های بسیاری دارد. فلززایی قابل توجه از کانه‌زایی‌های استان می‌توان به کانسارهای مس چهل کوره [۳]، مس لونکا [۴]، طلای و مس سیاه‌جنگل [۵]، مس و طلای خارستان [۶]، کانسار استیبنیت- طلا شورچاه [۷]، کرومیت بندان [۸]، مس کوه گراغه [۹] و مس- مولیبدن لار [۱۰] اشاره کرد. در این پژوهش، منطقه زردکوه از نظر زمین‌شناسی، کانی‌سازی، زمین شیمی و سیال های درگیر بررسی شده که بررسی زمین‌شناسی اقتصادی برای نخستین بار انجام شده است، با توجه به شواهد معدنکاری قدیمی، گسترش و تنوع دگرسانی و کانی‌سازی در منطقه می‌تواند از نظر اقتصادی بسیار ارزشمند باشد و با در نظر داشتن این موضوع که بسیاری از پتانسیل‌های معدنی در این استان همچنان بکر باقی‌مانده‌اند، امید است که نتایج این پژوهش زمینه را برای پی‌جویی‌های علمی و هدفمند در بخش-های مختلف این منطقه فراهم نماید.

زمین‌شناسی

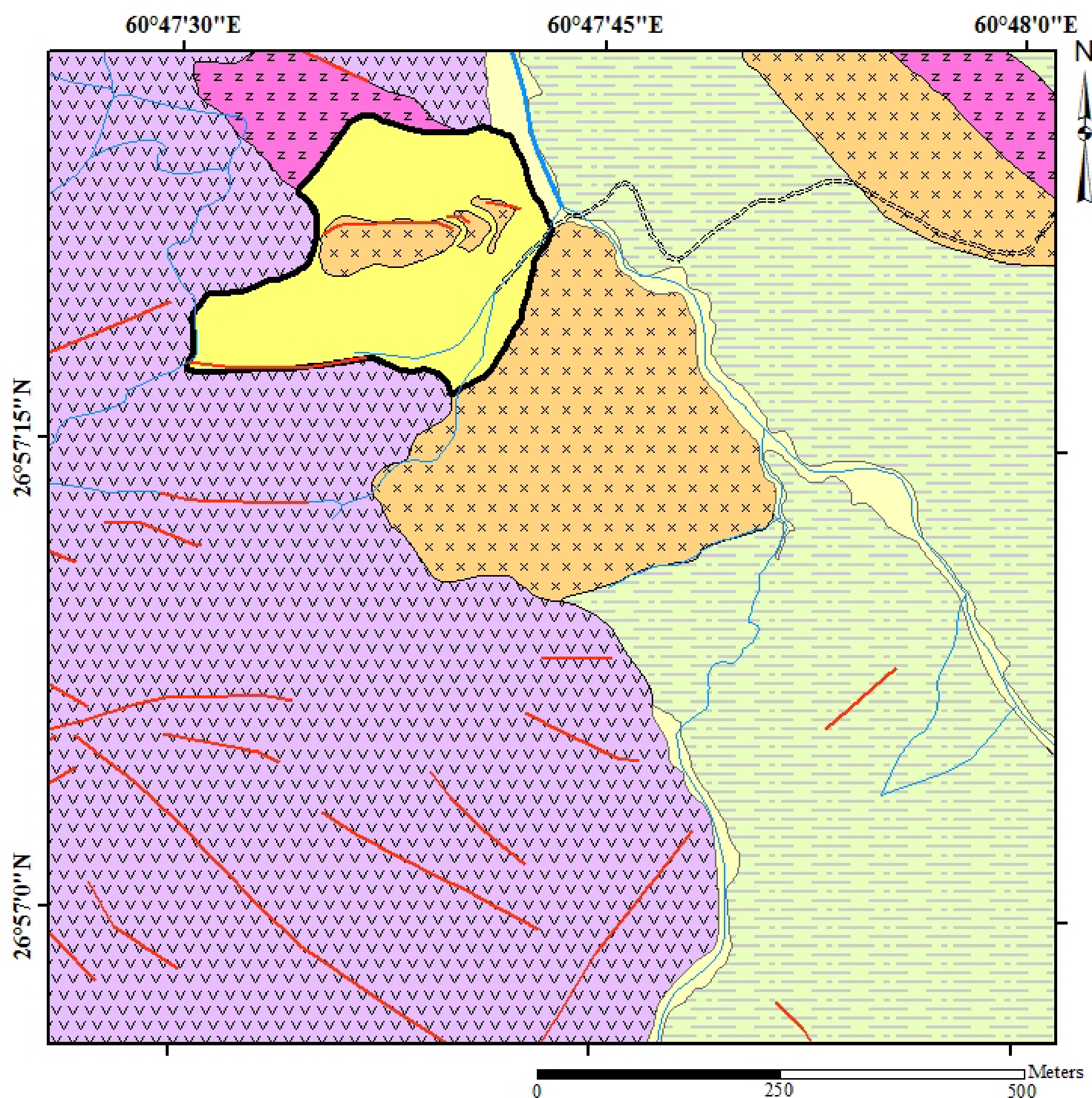
منطقه اکتشافی مس و طلای زردکوه در مرز حوضه پیش کمانی مکران با پهنه فلیش ایران قرار دارد که شامل بخشی از آمیزه‌های افیولیتی مکران (کرتاسه پسین) و واحدهای آتشفشانی-رسوبی است که توده‌های نفوذی نیمه‌عمیق (ائوسن) در آن نفوذ کرده‌اند [۱۱]. پهنه زمین‌ساختی مکران در جنوب فرورفتگی جازموریان در ناحیه بلوچستان قرار دارد. مرز غربی آن‌را گسل میناب تشکیل داده است و از جنوب به دریای عمان و از شرق در خاک پاکستان ادامه می‌یابد. در مرز شمالی این پهنه، گسل‌های معکوس بسیاری با روند شرقی-غربی وجود دارند که گسل بشاگرد از مهم‌ترین آنهاست. در راستای بیشتر این شکستگی‌ها، آمیزه‌های رنگی در سطح گسترده‌ای نمایان هستند. قدیمی‌ترین سنگ‌های این پهنه را آمیزه‌های رنگین تشکیل می‌دهند که مربوط به کرتاسه پسین-پالئوسن هستند، که در کرانه جنوبی فرورفتگی جازموریان حدود ۷۰ کیلومتر پهنا دارد و پس از آن به رسوب‌های ضخیم فلیش مانند ائوسن-الیگوسن، با ضخامت حدود ۵۰۰۰ متر می‌رسد که تناوبی از ماسه سنگ-شیل و مارن است و بر آن آمیزه‌های رنگین قرار دارد. این رسوب‌ها پیش از آغاز میوسن چین خورده‌اند. ضخامت رسوب‌های نوزا نیز زیاد و حدود ۵۰۰۰ متر است [۱۲].

در مقیاس منطقه‌ای براساس بررسی‌های صحرایی، واحدهای سنگی منطقه زردکوه از قدیم به جدید شامل آمیزه افیولیتی، دیاباز، توالی از شیل، کوارتز ارنایت، ماسه‌سنگ، آهک و توده نفوذی نیمه‌عمیق پیروکسن دیوریت تا مونزودیوریت هستند. رسوب‌های عهدحاضر به‌عنوان جوان‌ترین واحد رخنمون‌یافته در منطقه دیده می‌شوند (شکل ۱). در منطقه زردکوه، واحد آمیزه افیولیت بیشتر شامل سنگ‌های آتشفشانی زیردریایی اسپیلیت همراه با سنگ‌های رادیولاریتی بوده‌که نشان دهنده بخش پسین واحد افیولیتی در منطقه است. واحد آمیزه افیولیتی گسترش بسیاری داشته که در بخش غربی و جنوب‌غربی منطقه مورد بررسی قرار دارد، مکان‌نگاری این واحد خشن و به رنگ تیره دیده می‌شود (شکل ۲ الف). واحد آتشفشانی دیاباز به رنگ سیاه تا سبز است و در شمال‌غربی و شمال‌شرقی منطقه رخنمون دارد. این واحد سنگی دچار دگرسانی پروپیلیتی شده و مرز بین واحد دیابازی با واحدهای رسوبی گسلی است. مکان‌نگاری این واحد نیز خشن است (شکل ۲ ب).

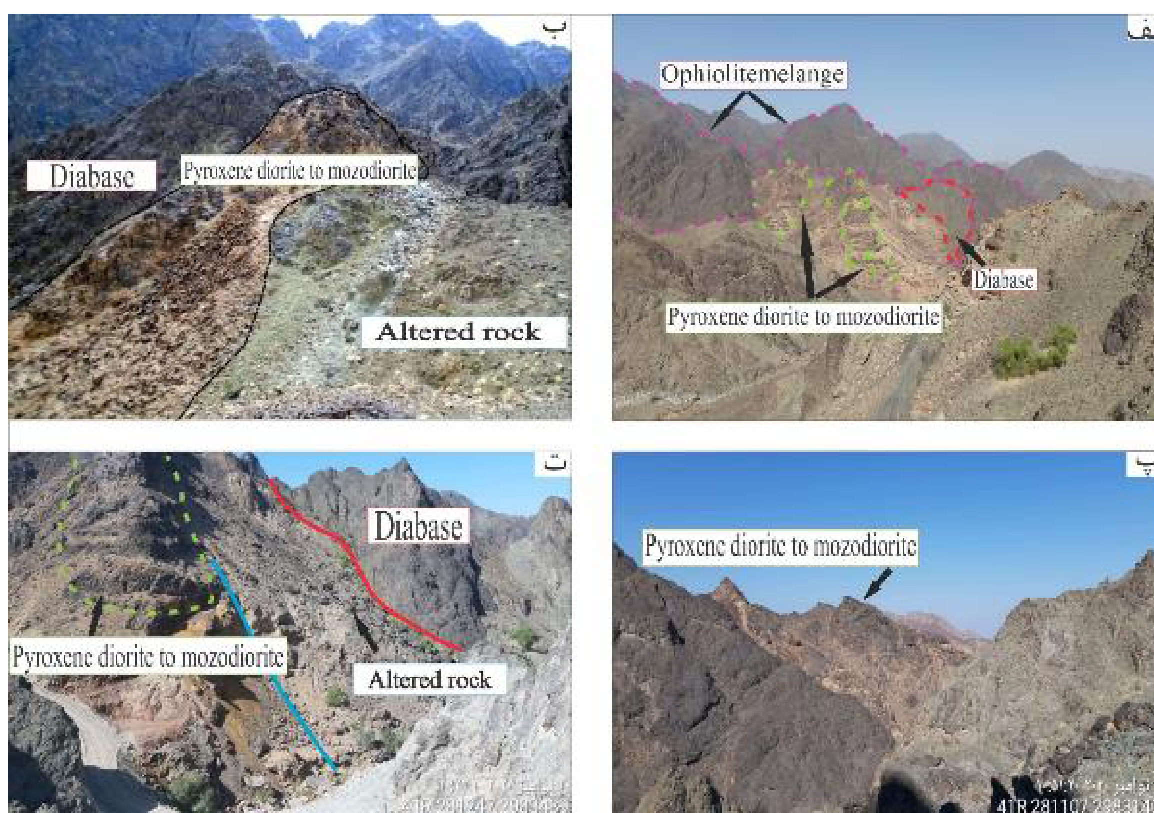
گسترش توالی از شیل، کوارتزارنایت، سنگ آهک در بخش-های شمالی، شرق و جنوب‌شرقی منطقه مورد بررسی بوده که رخنمون سنگی غالب منطقه نیز است. مکان نگاری این واحدها نسبت به سایر واحدهای سنگی پست‌تر بوده و رنگ سبز غالب است.

گسترش توده نفوذی نیمه عمیق پیروکسن دیوریتی تا مونزودیوریت به سن ائوسن [۱۱] در دو بخش منطقه مورد بررسی است که اغلب در مرکز منطقه اکتشافی زردکوه و به همراه واحد دیابازی در شمال‌شرقی منطقه نیز دیده می‌شود و در صحرا به رنگ قهوه‌ای است (شکل ۲ پ). کانی‌های تشکیل دهنده این واحد شامل پلاژیوکلاز، پیروکسن و کانی‌های کدر هستند، دگرسانی این واحد پروپیلیتیک است و اغلب در صحرا به رنگ قهوه‌ای دیده می‌شود. این توده در واحدهای به شدت دگرسان شده نیز نفوذ کرده است که این دگرسانی‌ها سیلیسی و آرژیلیک هستند و مرز شرقی آن واحد دیابازی است (شکل ۲ ت). روند عمومی گسل‌های منطقه اغلب شمال‌غرب- جنوب-شرق، شرقی- غربی و کمی شمال‌شرق- جنوب‌غرب است.

واحد دگرسان شده در مرکز منطقه مورد بررسی دیده می-شود و توده‌های نیمه نفوذی درون آنها نفوذ کرده است. به علت حجم بالای دگرسانی، نمی‌توان نام دقیقی برای این واحد در نظر گرفت. دگرسانی‌های سیلیسی و آرژیلیک این واحد را دربر‌گرفته‌اند.



شکل ۱ نقشه زمین‌شناسی-کانی‌سازی منطقه اکتشافی زردکوه با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰.



شکل۲ تصاویر صحرایی از واحدهای سنگی منطقه اکتشافی زردکوه: الف) واحدهای آمیزه افیولیت آمیزه (رنگ بنفش)، واحد پیروکسن دیوریت تا مونزودیوریت (رنگ سبز)، واحد دیاباز (رنگ قرمز)، دید به سمت غرب، ب) واحد دیاباز، پیروکسن‌دیوریت تا مونزودیوریت و سنگ های دگرسان شده دید به سمت شمال، پ) واحد پیروکسن دیوریت تا مونزودیوریت، دید به سمت شمال، ت) واحد پیروکسن دیوریت تا مونزودیوریت (رنگ سبز)، واحد دیاباز (رنگ قرمز)، سنگ های دگرسان شده (رنگ آبی) دید به سمت غرب.

روش بررسی

برای شناسایی ماهیت کانی‌سازی در منطقه اکتشافی زردکوه، بررسی‌های صحرایی و آزمایشگاهی انجام شد. در بخش صحرایی، همه ویژگی‌های ساختی، بافتی و چگونگی ارتباط پدیده‌ها بررسی شد. به‌منظور بررسی‌های سنگ‌شناسی، دگرسانی و کانی‌سازی در این منطقه، تعداد ۱۱۰ نمونه از واحدهای مختلف سنگی برداشت شد که از این میان، تعداد ۴۰ مقطع نازک برای بررسی‌های سنگ‌نگاری و دگرسانی تهیه گردیده همچنین ۲۰ مقطع نازک صیقلی و ۵ قطعه صیقلی از بخش‌های کانی‌سازی تهیه شد. نقشه زمین‌شناسی با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰ با نرم‌افزار ArcGIS رسم گردید. بررسی زمین شیمی کانی‌سازی با برداشت ۱۹ نمونه خرده‌سنگی (از سطح و ترانشه‌ها)، آماده‌سازی آن‌ها با تیزآب سلطانی و تجزیه به روش طیف‌سنجی نشری پلاسمای جفت شده القایی (ICP-OES) برای ۳۶ عنصر از جمله مس، سرب، روی در آزمایشگاه زرآزما انجام شد. تعداد ۱۹ نمونه برای طلا با روش عیارسنجی در همین آزمایشگاه تجزیه شدند. ۱۱ نمونه از رگچه‌های کوارتز دارای کانی‌سازی پس از بررسی‌های دقیق (مهم‌ترین کانی باطله) برای تهیه مقطع دوبر صیقل انتخاب گردیده و در دانشگاه فردوسی مشهد مقاطع دو بر صیقل آن‌ها تهیه و سیال-های درگیر آن‌ها بررسی شد. بررسی سیال های درگیر با استفاده از یک دستگاه سردکننده و گرم‌کننده با دقت $\pm1^{\circ}C$ و گستره دمایی ۱۹۰- تا ۶۰۰+ درجه سانتی‌گراد، ساخت شرکت لینکام مدل THM 600 انجام شد. مقدار شوری در سامانه H_2O-NaCl با استفاده از برنامه تعبیه شده در نرم‌افزار اکسل محاسبه شد [۱۳، ۱۴] و سپس نمودارها با نرم‌افزار SPSS رسم گردیدند.

دگرسانی و کانی‌زایی

دگرسانی در منطقه زردکوه به سه بخش تقسیم می‌شود. سیلیسی‌شدن مهم‌ترین دگرسانی در بخش‌هایی از توده حدواسط است که همراه با کانی‌سازی و به‌صورت تشکیل

کوارتز دیده می‌شود. این دگرسانی محدود به پیرامون کانی‌سازی است که همراه با اکسید آهن مشاهده می‌شود. این پهنه در منطقه مورد بررسی گسترش کمتری نسبت به بقیه دگرسانی‌ها دارد، در این نوع دگرسانی، کوارتز جانشین کوارتزهای اولیه و فلدسپات‌ها شده است. کوارتزهای ثانویه اغلب ریز دانه تا متوسط دانه هستند و بین ۵ تا ۶۰ درصد کوارتزهای اولیه به کوارتزهای ثانویه تبدیل شده‌اند. رخنمون کلاهک سیلیسی به شکل توده‌های سیلیسی بی‌قاعده و کلاهک‌های سیلیسی نهان‌بلور دانه‌ریز خاکستری تا شیری رنگ (وگاه حفره‌دار) در سطح دیده می‌شود. مقدار سیلیس این بخش‌ها بیش از ۹۰ درصد است. توده‌های سیلیسی بی‌قاعده به صورت پهنه‌های باقی‌مانده ۱۰ تا ۱۵ متری پراکنده در میان پهنه‌های دگرسانی آرژیلیک دیده می‌شوند که در اثر انحلال عناصر سدیم، پتاسیم، کلسیم و منیزیم از سنگ‌های سیلیکاتی و برجای‌ماندن سیلیس، رخ می‌دهد. گاهی اسیدشویی در شرایط Eh اکسایشی و pH کاملا اسیدی منطقه ادامه و گسترش یافته و به تشکیل پهنه گوسان منجر شده است. دگرسانی آرژیلیک در مرکز منطقه و پیرامون توده کانی‌سازی و دگرسانی سیلیسی در گستره اکتشافی دیده می‌شود، صعود بخارهای ناشی از سرد شدن توده‌های نفوذی که طی سرمایش سریع، قدرت اسیدی آن‌ها به طور فزاینده‌ای افزایش یافته‌است و برخورد آنها (دارای HCl، HF و SO_2^{-2}) با آب‌های جوی سرد عامل شسته شدن سنگ‌های پیرامون و تشکیل پهنه دگرسانی آرژیلیک است. گسترش پهنه آرژیلیک در سطح متوسط است. در بررسی‌های صحرایی، این پهنه به رنگ سفید متمایل به زرد عسلی دیده می‌شود. رخنمون سطحی آن در مرکز منطقه و پیرامون توده‌های پیروکسن دیوریت تا مونزودیوریت دیده می‌شود، کانی‌های اصلی تشکیل دهنده دگرسانی آرژیلیک در منطقه کوارتز، کائولینیت، ژاروسیت و ناتروژاروسیت هستند. دگرسانی پروپلیتی به‌صورت ناحیه‌ای است که گسترش قابل‌توجهی در منطقه اکتشافی دارد. اثر این نوع دگرسانی بر واحدهای سنگی آذرین منطقه نمایان است و شدت آن از ضعیف تا متوسط تغییر می‌کند. دگرسانی پروپلیتی ضعیف که بیشترین گسترش را در منطقه دارد، اغلب در بخش غربی، جنوب‌غربی و شمال-شرقی منطقه اکتشافی بوده که بر واحدهای آمیزه افیولیتی، دیاباز و پیروکسن دیوریت تا مونزودیوریت اثر داشته است. این واحدها تا حدود ۱۰ تا ۱۵ درصد حجمی دگرسان شده‌اند.

مهم‌ترین کانی‌های ثانویه ناشی از دگرسانی در این پهنه به ترتیب اهمیت کلریت، کلسیت، اکسیدهای آهن، سریسیت، کانی‌های رسی و اپیدوت هستند.

کلسیت در منطقه مورد بررسی به دو صورت تجزیه درشت بلورهای سنگ و رگچه‌ای دیده می‌شود. این کانی از تجزیه پلاژیوکلاز و پیروکسن ناشی شده است و هریک از آنها حدود ۵ تا ۷درصد به کلسیت تبدیل شده‌اند. رگچه‌های کربناتی (کلسیتی) با ضخامت تقریبی ۰/۴ میلیمتر در واحدهای پیروکسن دیوریت و متادیابازی دیده می‌شوند. کلریت هم در زمینه سنگ و هم به صورت جانشینی در کانی‌های مافیک چون هورنبلند، بیوتیت و پیروکسن وجود دارد. بیشتر کلریت‌ها دوشکستی سبز دارند. مقدار تجزیه کلریت در مقاطع مختلف متفاوت است به طوری که در برخی از نمونه‌ها، به ندرت تجزیه کلریت دیده می‌شود و در برخی دیگر، کانی‌های مافیک ۴ تا ۸ درصد به این کانی دگرسان شده‌اند. در میان کانی‌های مافیک، هورنبلند و کمی بیوتیت به شدت به اکسیدهای آهن تبدیل شده‌اند، به طوریکه میزان تبدیل به اکسیدهای آهن بین ۲۰ تا ۵۰ درصد متغیر است.

دگرسانی پروپلیتی متوسط بیشتر در واحدهای دیاباز در بخش شمال‌غربی دیده می‌شود حدود ۱۵ تا ۲۵ درصد حجمی پیروکسن دیوریت تا مونزودیوریت که اغلب در مرکز منطقه رخنمون دارند، دستخوش این دگرسانی شده‌اند. پیروکسن‌ها ۴۰ تا ۵۰ درصد به کلریت و هورنبلندها حدود ۱۵ تا ۲۰ درصد به کلریت دگرسان شده‌اند و حدود ۵ تا ۱۰ درصد پلاژیوکلازها به اپیدوت تبدیل شده است (شکل ۳ الف).

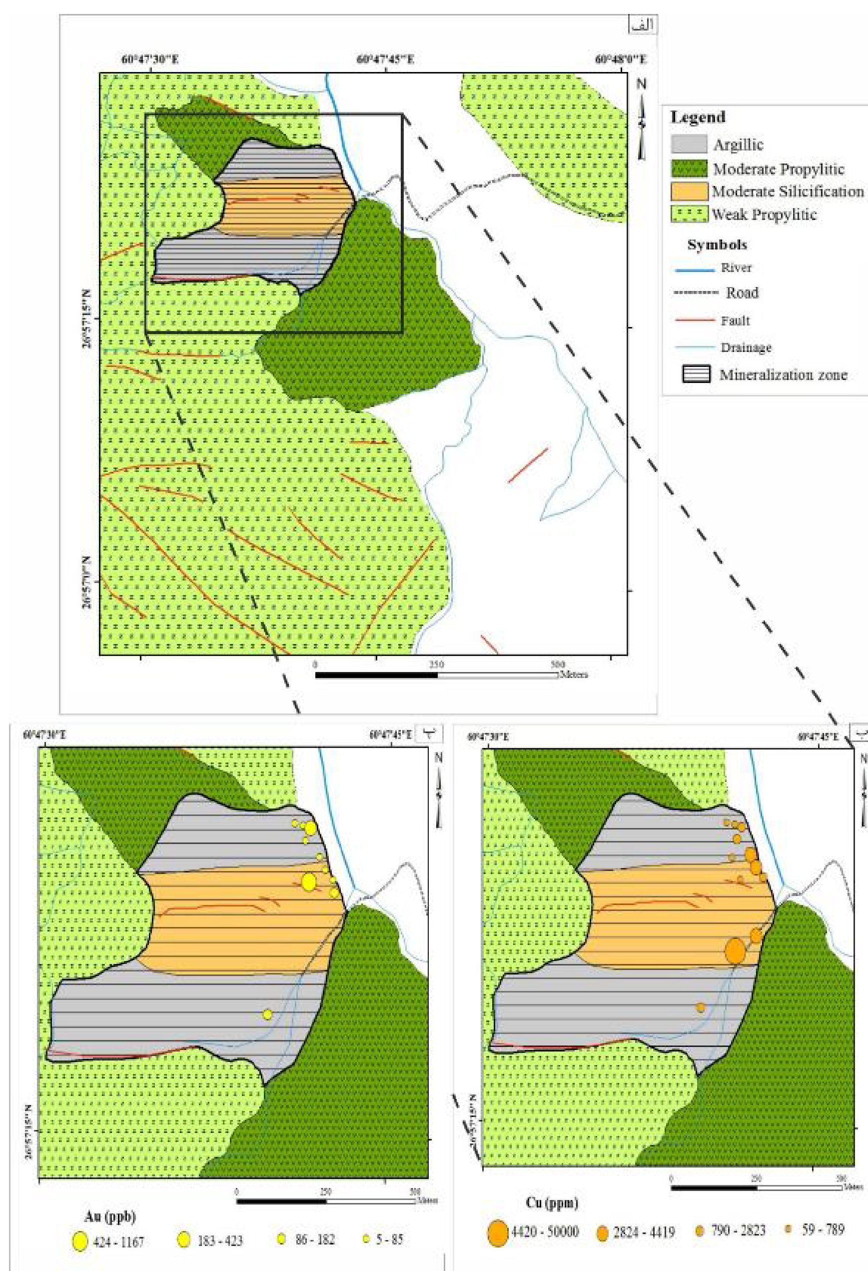
کانه‌زایی در منطقه زردکوه درون توده نفوذی پیروکسن دیوریت تا مونزودیوریت در قالب ساخت و بافت‌های توده‌ای، رگچه‌ای، جانشینی، گل کلمی و پراکنده دیده می‌شود. کانی‌سازی اصلی از نوع گچه‌های سیلیسی-سولفیدی است. رگچه‌های کوارتز+کالکوپیریت+پیریت ضخامت کمتر از ۵ سانتی‌متر دارند. در این رگچه‌ها، حدود ۵ درصد پیریت، ۱۰ درصد کالکوپیریت و بقیه کوارتز است.

کانی‌زایی در منطقه به دو صورت اولیه (درونزاد) و ثانویه (برونزاد) دیده می‌شود. کانی‌زایی اولیه به شکل کانه‌های سولفیدی کالکوپیریت و پیریت رخ داده است که به‌صورت پراکنده و رگچه‌ای وجود دارد (شکل ۴ الف) [۱۵]. از کانی‌های

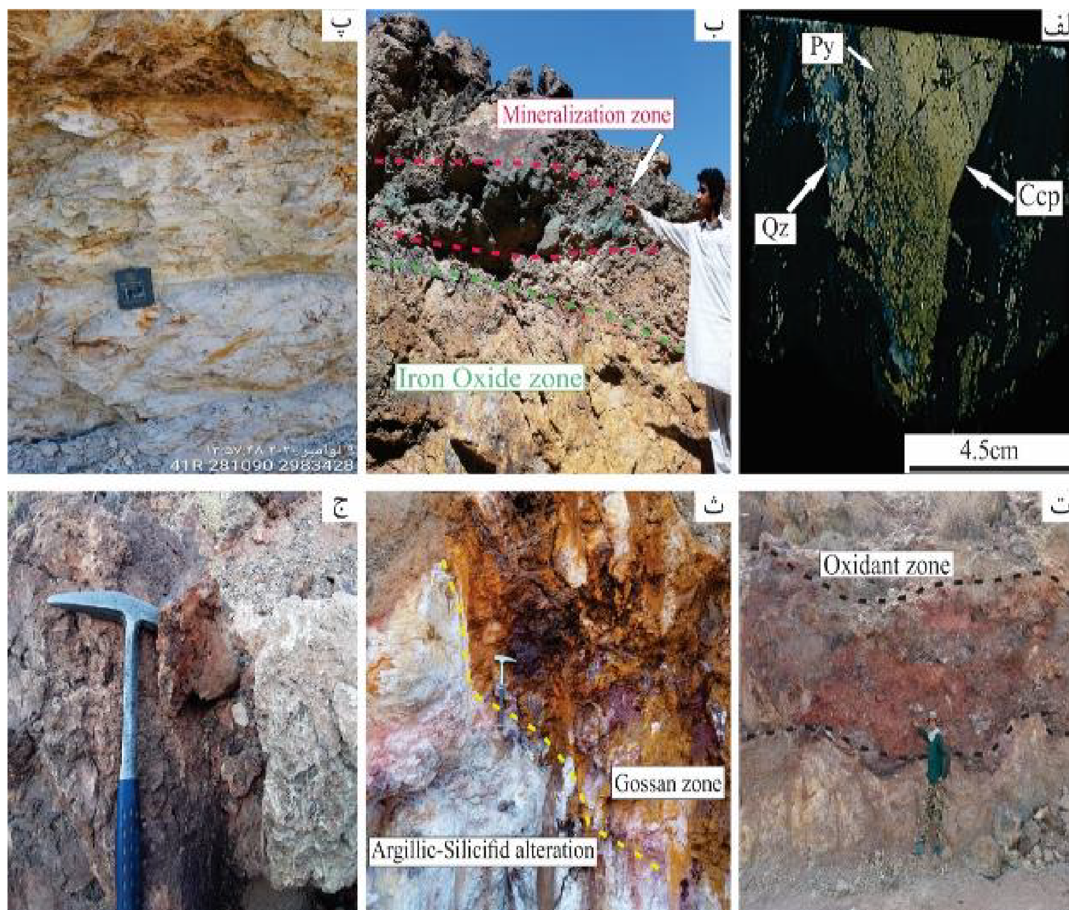
[DOR: 20.1001.1.17263689.1401.30.4.9.9]
[DOI: 10.52547/ijcm.30.4.697]

ثانویه به ترتیب فراوانی می‌توان به مالاکیت، آزوریت، کالکوسیت، کوولیت و اکسیدهای آهن اشاره نمود (شکل ۴ ب).

کانی‌های سولفیدی در معرض هوازدگی شدید و آب های جوی قرارگرفته و در اثر اکسایش جای خود را به کانی‌های سولفیدی ثانویه (کالکوسیت، کوولیت)، اکسیدهای آهن ثانویه گوتیت، لیمونیت و یا کانی‌های سولفاتی چون ژاروسیت و نیز کانی‌هایی مانند مالاکیت، آزوریت و غیره داده‌اند. رنگ قرمز قهوه‌ای شکل گرفته در رگچه‌ها، سنگ‌ها و قالب‌هایی از کانی پیریت افشان که به گوتیت تبدیل شده‌اند، بیانگر تشکیل پهنه اکسایشی در سطح زمین است (شکل ۴ پ). در برخی مناطق پهنه اکسایشی، کانی ژاروسیت به شکل‌های پرکننده شکستگی و جانشینی در پیریت رگچه‌ای دیده می‌شود. شکل‌گیری ژاروسیت در ارتباط با اکسایش پیریت‌ها و ایجاد محیطی اسیدی با گریزندگی اکسیژن بالا [۱۶] و غنی از سولفات است (شکل ۴ ت). نفوذ مکرر آب‌های سطحی سبب شسته شدن اکسیدهای آهن و ته‌نشست آنها به شکل قشرهای رنگین می‌شود.



شکل ۳ الف) نقشه دگرسانی منطقه اکتشافی زردکوه، ب) نقشه زمین شیمیایی ناهنجاری تک متغیره مس، پ) نقشه زمین شیمیایی ناهنجاری تک متغیره طلا .



شکل۴ کانی‌سازی در منطقه اکتشافی زردکوه، الف) تصویر نمونه دستی از حضور کانی‌های کالکوپیریت و پیریت به صورت پراکنده و رگچه‌ای در ~~رگچه‌های~~ رگچه های سیلیسی(Ccp: کالکوپیریت، Py: پیریت، Qz: کوارتز)، ب) کانی‌زایی مالاکیت، آزوریت به همراه اکسیدهای آهن، پ) رگچه-های داربستی پیریت که در اثر اکسایش تبدیل به ژاوروسیت و لیمونیت شده‌اند، ت) پهنه اکسایشی تشکیل شده در سطح زمین، ث) پهنه گوسان در کنار دگرسانی‌های آرژیلیک و سیلیسی، ج) حضور سیلیس‌های خاکستری که اغلب شامل هماتیت و گوتیت هستند. [۱۵].

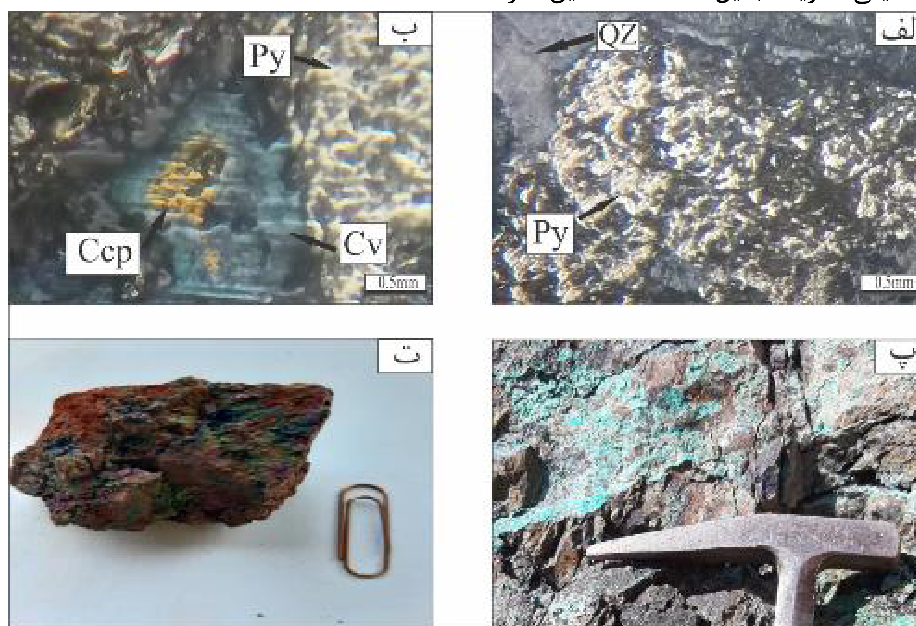
در مرتفع‌ترین بخش پهنه آرژیلیک، پهنه‌های قرمز تیره تا قهوه‌ای رنگ گوسان دیده می‌شود (شکل ۴ ث). کانی‌شناسی پهنه گوسان شامل هیدرواکسیدهای آهن بی‌شکل، گوتیت، هماتیت، لیمونیت، ژاروسیت همراه با کانی‌های باطله سنگ گچ، کانی‌های رسی، سیلیس و کمی کانی‌های کربناتی است. اکسیدهای آهن در منطقه بیشترین توزیع را در پهنه گوسان (گاه بیش از ۱۰ درصد) دارند. در این مناطق به دلیل اکسایش زیاد، رنگ قهوه‌ای تیره در سنگ‌ها ایجاد شده است و همه کانی‌های سنگ و کانی‌های سولفیدی از بین رفته است و فقط کوارتزهای رگچه‌ای به صورت دیواره سیلیسی سخت همراه ژاسپروئید، گوتیت و هماتیت را به وجود آورده‌اند (شکل ۴ ج).

کانی‌شناسی

پیریت با فراوانی در حد ۱۵ تا ۲۰ درصد همراه با کالکوپیریت در منطقه و در رگه‌های سیلیسی-سولفیدی دیده می‌شود. اندازه دانه‌های پیریت بین ۰/۵ تا ۶ میلی‌متر است. در تصاویر میکروسکوپی، پیریت به‌صورت شکل‌دار و بی‌شکل دیده می-شود. پیریت به شکل افشان، پراکنده، جانشینی و رگچه‌ای درون درزه‌ها و شکستگی‌ها حضور دارد. (شکل ۵ الف).

کالکوپیریت به‌صورت پراکنده و درون رگچه‌های سیلیسی-سولفیدی با توزیع بسیار کم (کمتر از ۱۵-۱۰ درصد حجمی) همراه با کوارتز دیده می‌شود (شکل ۵ الف). در تصاویر میکروسکوپی، این کانی به‌صورت بی‌شکل با اندازه ۰/۱ تا ۴ میلی‌متر وجود دارد. کالکوپیریت در برخی از رگچه‌ها به علت رخدادهای زمین‌ساختی و فعالیت دوباره گسل‌ها، دچار

شکستگی شده است. اغلب در نواحی شکستگی، کالکوپیریت به کوولیت با بافت جانشینی ثانویه تبدیل شده است. این امر سبب گسترش فرآیند اکسایش می‌شود.



شکل۵ تصاویری از کانه‌زایی منطقه اکتشافی زردکوه: الف) حضور پیریت همراه کوارتز، ب) جانشینی ثانویه کوولیت در نتیجه اکسید شدن کالکوپیریت پ) کانی‌زایی مالاکیت و آزوریت، ت) نمونه دستی از اکسیدها و هیدرواکسیدهای آهن (Ccp: کالکوپیریت، Py: پیریت، Qz: کوارتز، Cv: کوولیت) [۱۵]، تصاویر میکروسکوپی در نور قطبیده متقاطع (XPL) گرفته شده‌اند.

کالکوسیت و کوولیت با بافت جانشینی ثانویه از تبدیل کانی کالکوپیریت به وجود آمده‌اند و تنها همراه با رگچه‌های کالکوپیریت اکسیده دیده می‌شوند. از تبدیل کالکوپیریت، نخست کالکوسیت و سپس کوولیت تشکیل شده است. فراوانی کالکوسیت حدود ۱-۳ درصد و مقدار کوولیت ۲-۷ درصد حجم کانی‌سازی است (شکل ۵ ب).

مالاکیت و آزوریت از کانی‌های ثانویه کربنات آبدار مس هستند. مقدار مالاکیت بسته به مقدار کانی‌های سولفیدی مس موجود در توده متفاوت است. مالاکیت با دیگر کانی‌های ثانویه چون کالکوسیت، آزوریت و اکسیدهای آهن همراه و به‌صورت لکه‌های پراکنده و رگچه‌ای در نواحی اکسایشی و برون‌زاد دیده می‌شود. در نمونه دستی، فراوانی مالاکیت حدود ۵-۴ درصد است (شکل ۵ پ). آزوریت با فراوانی بسیار کمتر نسبت به مالاکیت همراه با این کانی دیده می‌شود. مقدار آزوریت در نمونه‌ها بین ۱ تا ۴ درصد متغیر است.

اکسیدهای آهن هماتیت و گوتیت از تبدیل کانی‌های سولفیدی به‌ویژه پیریت شکل گرفته‌اند. اکسیدهای آهن فراوان‌ترین کانی ثانویه در منطقه اکتشافی زردکوه هستند که با ادامه اکسایش گوتیت به لیمونیت تبدیل می‌شوند. لیمونیت به رنگ نارنجی- زرد و هماتیت به رنگ قرمز دیده می‌شود (شکل ۵ ت).

کوارتز مهم‌ترین و فراوان‌ترین باطله است که به دو صورت سیلیسی شدن خمیره سنگ و درون رگچه‌های سیلیسی- سولفیدی دیده می‌شود. کوارتز اغلب به‌عنوان سیمان به شکل پرکننده فضای خالی و رگچه‌ای ایجاد شده که کوارتز نوع رگچه‌ای جدیدتر است. ۷۵ تا ۱۰۰ درصد رگچه‌های سیلیسی- سولفیدی با کوارتز پر شده‌اند که اندازه بلورهای کوارتز از ۳۰۰- ۵۰ میکرون متفاوت است.

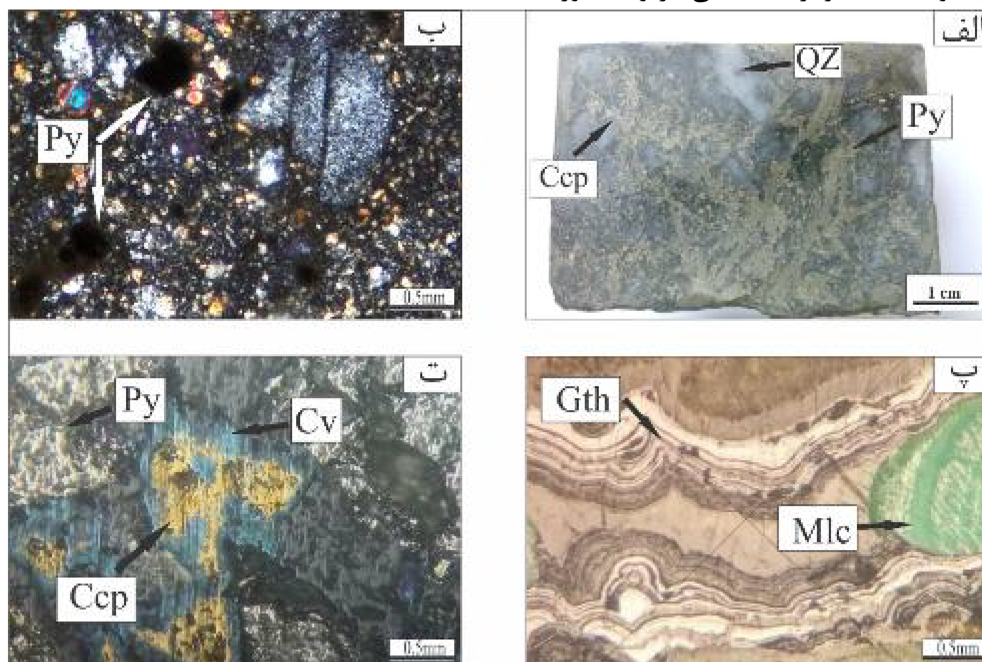
ساخت و بافت ماده معدنی

کانی‌سازی در منطقه مورد بررسی در قالب ساخت و بافت‌های رگچه‌ای، جانشینی ثانویه، گل کلمی و، پراکنده دیده می‌شود. ساخت و بافت‌های مهم طی بازدیدهای صحرایی و بررسی‌های میکروسکوپی در ادامه توصیف می‌شوند.

رگچه‌ای: محلول‌های ماگمایی یا گرمابی در صورتی که هنگام عبور از گسل‌ها، درزه و شکاف‌ها بار خود را برجای گذارند، ساخت و بافت شکل گرفته از نوع رگچه‌ای است. عمده کانی-

[DOR: 20.1001.1.17263689.1401.30.4.9.9]
[DOI: 10.52547/ijcm.30.4.697]

زایی سولفیدی به‌صورت رگچه‌ای بوده است. ضخامت این رگچه‌ها متغیر بوده و اغلب کمتر از ۱۰ سانتی‌متر و به صورت رگچه کوارتز+کالکوپیریت+پیریت است (شکل ۶ الف).



شکل۶ تصایری از بافت‌های کانی‌زایی در منطقه اکتشافی زردکوه: الف) بافت رگچه‌ای کانی‌های کالکوپیریت و پیریت درون زمینه سیلیس، ب) بافت پراکنده، پ) بافت گل کلمی در مالاکیت و گوتیت، ت) بافت جانشینی ثانویه کوولیت در لبه کالکوپیریت و پیریت، [۱۵] (Ccp: کالکوپیریت، Py: پیریت، Qz: کوارتز،Cv : کوولیت، Mlc: مالاکیت و Gth: گوتیت). تصاویر میکروسکوپی در نور XPL گرفته شده‌اند.

دانه پراکنده: بافت دانه پراکنده در همه بخش‌های کانسار دیده می‌شود. در نزدیکی رگه‌ها، این بافت درون سنگ میزبان دیده می‌شود. رخداد این بافت درون رگه‌ها را می‌توان مربوط به نفوذ سیال‌های گرمابی درون سنگ میزبان دانست. کانی‌های کالکوپیریت و پیریت و گاهی فراورده‌های ثانویه آن‌ها به‌صورت پراکنده تشکیل شده‌اند. کمتر از ۱۰درصد حجم سنگ مربوط به این بافت است. پیریت‌ها در این بافت به‌صورت بین دانه‌ای تا دانه‌ای پراکنده دیده می‌شوند (شکل ۶ ب).

گل کلمی: این بافت در بخش‌های اکسایشی که پیریت‌ها بیشتر به گوتیت و هماتیت تبدیل شده‌اند، دیده می‌شود. بافت گل کلمی در مالاکیت و همچنین گوتیت بر اثر هوازدگی کانی‌های سولفیدی و اکسیدهای آهن ایجاد شده است. حضور این بافت در ذخایر معدنی نشانه دمای کم محلول گرمابی است (شکل ۶ پ).

بافت جانشینی ثانویه: واکنش محلول با کانی‌های پیشتر تشکیل شده، سبب جانشینی کانی جدید در لبه کانی قبلی و یا جانشینی کامل آن می‌شود. کانی‌های مالاکیت، آزوریت، کالکوسیت و کوولیت از جانشینی کالکوپیریت تشکیل شده‌اند، به‌طوری که گاهی آثاری از کالکوپیریت‌ها در میان این کانی‌ها به جا مانده است. میزان تبدیل کالکوپیریت از ۵ تا ۲۰ درصد متغیر است. پیریت نیز ۵-۱۰۰ درصد به کانی‌های هماتیت و گوتیت تبدیل شده است. این بافت همچنین در شرایط هوازدگی و ایجاد کانی‌های برونزاد نیز به وجود می‌آید. جانشینی اغلب از لبه بلور شروع می‌شود و در راستای رخ‌ها و درز و شکستگی‌ها به‌طور نامنظم ادامه می‌یابد (شکل ۶ ت).

زمین شیمی

براساس نتایج تجزیه زمین شیمی (جدول ۱)، منطقه دارای ناهنجاری مس و طلا است. نمونه‌برداری به دلیل دشواری گذار در بخش غربی گستره کانی‌سازی، بیشتر از بخش شرقی منطقه انجام شد. عیار مس از ۵۹ تا بیش از ۵۰۰۰۰ گرم بر تن اندازه-گیری شد که با توجه به وجود کالکوپیریت، مالاکیت و آزوریت، چنین مقداری قابل پیش‌بینی بوده‌است (شکل ۳ ب). مقدار سرب از ۶ تا ۷۸۱ گرم در تن و روی از ۱۱ تا ۷۵۹ گرم در تن متغیر است. مقدار آرسنیک بین ۹/۱ تا بیش از ۱۰۰ گرم برتن

[DOR: 20.1001.1.17263689.1401.30.4.9.9]
[DOI: 10.52547/ijcm.30.4.697]

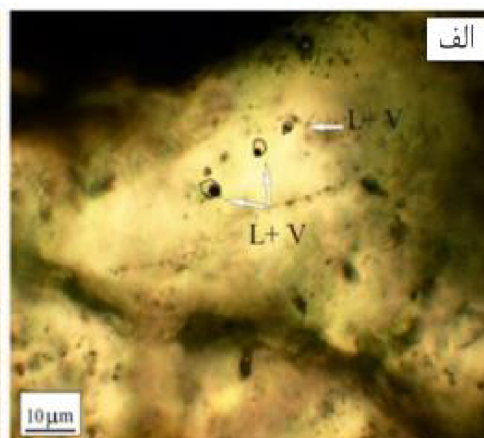
است. مقدار نقره در این منطقه در گستره ۰٫۳۲ تا ۳٫۷ گرم بر تن و مولیبدن از ۶۶ تا ۱۷۱ گرم برتن اندازه‌گیری شده است. کانی‌سازی در منطقه زردکوه بصورت رگچه کوارتز+ کالکوپیریت+ پیریت همراه با دگرسانی سیلیسی+ آرژیلیکی درون سنگ میزبان پیروکسن دیوریت دیده می‌شود. براساس نتایج تجزیه به روش عیارسنجی گرمایی، عیار طلا در منطقه اکتشافی زردکوه از ۰٫۰۵ تا ۱٫۱ گرم در تن متغیر است. ناهنجاری طلا همراه با کانی‌سازی مس در رگچه کوارتز+ کالکوپیریت+ پیریت درون سنگ‌های پیروکسن دیوریت با دگرسانی سیلیسی+ آرژیلیک دیده می‌شود. کانی طلای آزاد دیده نشده و ممکن است طلا در غالب کانی‌های سولفیدی چون پیریت حضور داشته‌باشد (شکل ۳ پ). از عوامل حضور آهن در منطقه، اکسیدهای آهن هماتیت و گوتیت و مربوط به تجزیه کانی سولفیدی و پهنه گوسان هستند.

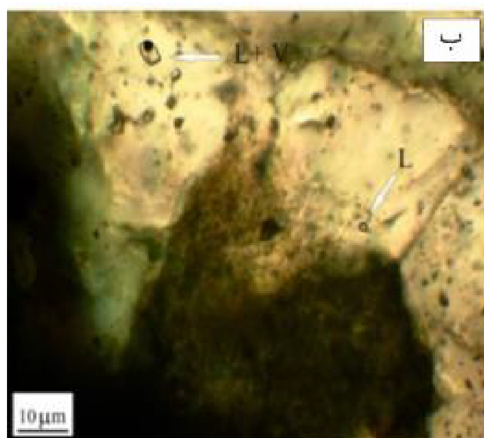
بررسی سیال‌های درگیر

از نظر ریخت‌شناسی، سیال‌های درگیر ممکن است به‌صورت بلورهای منفی، کروی، میله‌ای، بیضوی، مستطیلی و نامنظم دیده شوند [۱۷]. در منطقه اکتشافی زردکوه، کوارتز مهم‌ترین و فراوان‌ترین کانی غیرفلزی بصورت رگچه‌های کوارتز+ کالکوپیریت+ پیریت است. این رگچه‌ها دارای سیال‌های درگیر مناسب برای تعیین دما و شیمی محلول کانه‌دار هستند. سیال درگیر برای ۱۱ مقطع دوبر صیقل کوارتز بررسی شد. سیال‌های درگیر اغلب بصورت کروی تا بی‌شکل هستند و گاه مخروطی، دایره‌ای و بیضوی و کشیده شده دیده می‌شوند. بزرگ‌ترین سیال‌های درگیر در منطقه به‌صورت تک فازی مایع (L) و دو فازی مایع و بخار (L+V) هستند. طول سیال‌ها به ۱۰ میکرون می‌رسد، اما بیش‌ترین اندازه آن‌ها در منطقه ۷-۵ میکرون و قطر حباب گاز در نمونه ۲-۱ میکرون است (شکل ۷).

جدول۱ نتایج تجزیه زمین شیمی منطقه اکتشافی زردکوه.

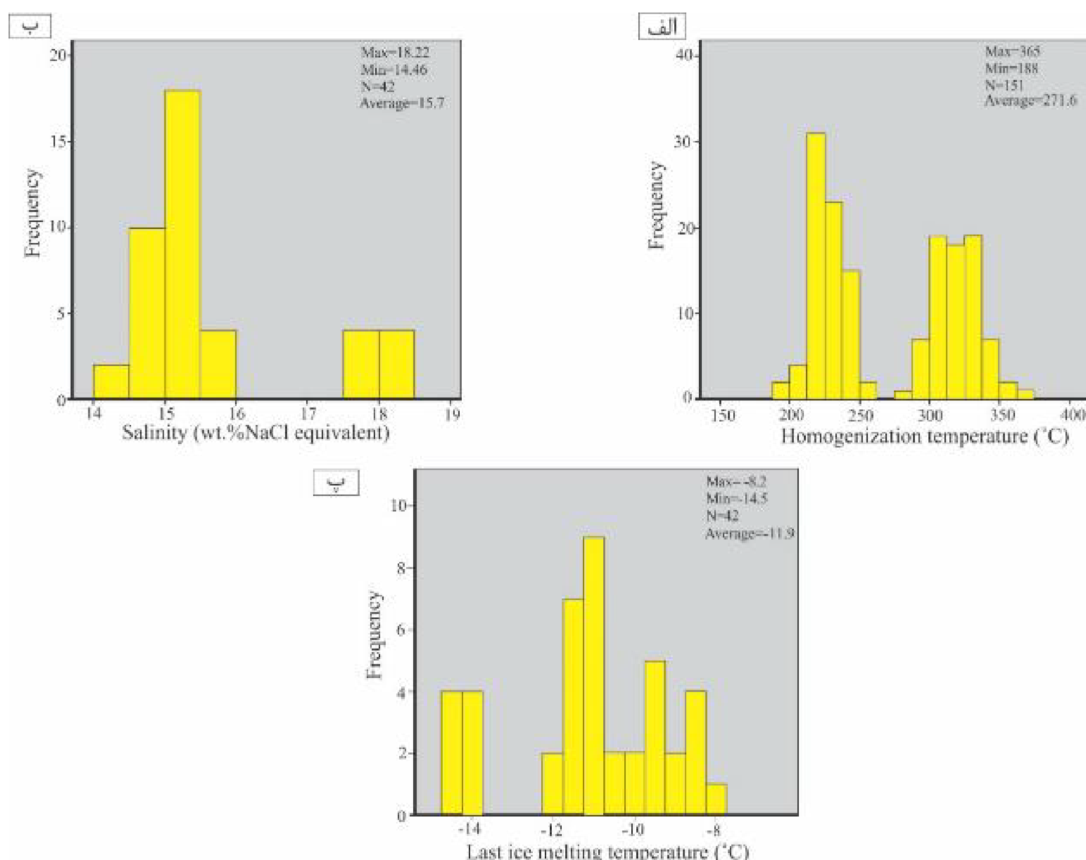
شماره نمونه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	طلا (ppb)	مس (ppm)	مولیبدن (ppm)	نقره (ppm)	روی (ppm)	سرب (ppm)	آرسنیک (ppm)
ZK1	۶۰°۴۷′۴۳″	۲۶°۵۷′۲۳″	۷	۳۲۲۷	۰٫۶۶	۰٫۳۵	۴۶	۱۶	۲۰٫۸
ZK8	۶۰°۴۷′۴۱″	۲۶°۵۷′۲۴″	۵	۷۸۹	۶۱٫۶	۱	۳۷	۴۵	۱۰۰
ZK9	۶۰°۴۷′۴۰″	۲۶°۵۷′۲۴″	۵	۵۹	۱۰٫۴	۱	۲۱	۱۴۱	۴۰
ZK13	۶۰°۴۷′۴۲″	۲۶°۵۷′۲۳″	۷	۲۶۳۴	۰٫۷	۲٫۷	۴۸	۳۱	۹۷٫۷
ZK14	۶۰°۴۷′۴۱″	۲۶°۵۷′۲۰″	–	۶۰۰	۲۵٫۲	۳٫۷	۱۵	۹	۱۱٫۳
ZK17	۶۰°۴۷′۴۲″	۲۶°۵۷′۲۲″	۱۱۶۷	۲۹۴	۱۶٫۸	۱٫۱	۱۱	۲۲	۳۳٫۳
ZK21	۶۰°۴۷′۴۳″	۲۶°۵۷′۲۲″	۸۵	۲۰۸۶	۱۲٫۶	۰٫۹	۳۳	۲۷	۱۷٫۱
ZK24	۶۰°۴۷′۴۴″	۲۶°۵۷′۲۳″	۴۴	۴۴۱۹	۸۱	۰٫۳۲	۸۷	۲۵	۱۶٫۸
ZK25	۶۰°۴۷′۴۲″	۲۶°۵۷′۲۸″	۴۲۳	۲۱۰۶	۱۰۲	۱٫۵	۲۳	۷۸۱	۴۴٫۶
ZK31	۶۰°۴۷′۴۰″	۲۶°۵۷′۲۰″	–	۵۰۰۰۰	۱٫۵	۰٫۲۷	۷۵۹	۶	۱۲٫۴
ZK34	۶۰°۴۷′۴۳″	۲۶°۵۷′۲۱″	–	۳۳۵۶	۰٫۸۹	۰٫۲۷	۲۶۱	۱۱	۹٫۱
ZK42	۶۰°۴۷′۴۰″	۲۶°۵۷′۱۹″	۱۸۲	۲۸۲۳	۱۷۱	۱٫۲	۳۲	۴۸۳	۸۴٫۷
ZK20	۶۰°۴۷′۴۵″	۲۶°۵۷′۲۲″	۱۴۹	–	–	–	–	–	–





شکل۷ تصاویری از سیال‌های درگیر در رگچه‌های کوارتز و کوارتز+ پیریت+ کالکوپیریت در منطقه اکتشافی زردکوه، الف) سیال‌های دو فازی غنی از مایع (LV)، ب) سیال‌های دو فازی غنی از مایع (LV) و تک فازی مایع (L).

براساس نتایج ریزدماسنجی، دمای همگن‌شدگی برای سیال‌های درگیر نوع اولیه ۱۸۸ تا ۳۶۵ درجه سانتی‌گراد با میانگین ۲۷۱٫۶ درجه سانتی‌گراد است (شکل ۸ الف). براساس سامانه H_2O-NaCl، مقدار شوری برای سیال درگیر رگچه‌ها ۱۴٫۴ تا ۱۸٫۲ با میانگین ۱۵٫۷درصد وزنی نمک کلرور سدیم (NaCl) برآورد می‌شود (شکل ۸ ب). نخستین دمای ذوب‌شدگی (T_{fm}) ۴۷٫۶- تا ۴۶٫۵- درجه سانتی‌گراد با میانگین ۴۷٫۳- درجه سانتی‌گراد است (جدول ۲). این مقادیر حضور احتمالی نمک‌های NaCl و $CaCl_2$ در سیال درگیر را نشان می‌دهند. دمای ذوب آخرین بلور یخ (Tm) برای سیال‌های درگیر ۱۴٫۵- تا ۸٫۲- درجه سانتی‌گراد با میانگین ۱۱٫۹- درجه سانتی‌گراد است (شکل ۸ پ).



شکل ۸ نتایج دماسنجی سیال های درگیر در منطقه زردکوه: الف) دمای همگن شدگی، ب) شوری و پ) آخرین دمای ذوب یخ.

جدول۲ خلاصه نتایج بررسی‌های سیال های درگیر اولیه دو فازی مایع - بخار (LV) برای کانی کوارتز در منطقه اکتشافی زردکوه.

شماره نمونه	تعداد سیال	دمای همگن شدگی (°C)	نخستین دمای ذوب یخ (°C)	آخرین دمای ذوب یخ (°C)	شوری(.Wt.% equiv)
ZK3b4	۱۴	۳۲۶-۳۰۰	۴۷٫۳- تا -۴۷	۱۴٫۵- تا ۱۴٫۴-	**۱۷٫۸ تا ۱۸٫۲**
ZK3b5	۱۳	۳۱۵-۲۷۵	-	-	-
ZK3b1	۱۶	۳۴۰-۲۹۵	-	-	-
ZK1b16	۱۶	۳۳۸-۳۰۷	-	-	-
ZK5b2	۱۳	۳۶۵-۳۲۸	-	-	-
ZK1b11	۱۵	۳۱۵-۲۱۴	-	-	-
ZK1b8	۱۳	۲۴۲-۲۱۵	۴۷٫۶- تا ۴۷-	۱۱٫۷- تا ۱۰٫۹-	**۱۴٫۹ تا ۱۵٫۷**
ZK20	۱۱	۲۴۵-۱۹۸	۴۷٫۶- تا ۴۷-	۱۱٫۹- تا ۱۱-	**۱۴٫۹ تا ۱۵٫۹**
ZK22	۱۷	۲۳۰-۲۰۶	۴۷٫۵- تا ۴۶٫۵-	۸٫۸- تا ۱۰-	**۱۴٫۵ تا ۱۵٫۴**

۱۴٫۹ تا ۱۵٫۴	-۸٫۸ تا -۸٫۲	-۴۷٫۵ تا -۴۷	۲۳۰-۱۸۸	۱۳	ZK1b24
۱۴٫۵ تا ۱۵٫۴	-۱۱٫۴ تا -۱۰٫۷	-۴۷٫۶ تا -۴۷	۲۴۵-۲۲۸	۱۱	ZK15

بحث

تکامل سیال کانه‌ساز

همزمان با رشد بلورها، به علت ناهمسانی‌هایی که در رشد آن‌ها در اثر عوامل مختلف روی می‌دهد، فضاهایی در سطوح رشد بلور ایجاد شده و یا طی رشد، درزه‌هایی دربلور ایجاد می‌شود که محلول‌های کانه‌دار می‌توانند در آن‌ها محبوس شوند. به این فضاها و آنچه درون آن‌هاست سیال‌های درگیر گفته می‌شود. نمودار شوری نسبت به دمای همگن‌شدگی سیال‌های درگیر منطقه اکتشافی زردکوه نشان‌دهنده یک نوع رگچه با دماها و شوری‌های مختلف بوده که در شکل‌گیری کانی‌سازی نقش داشته است. آنچه در نمودار شوری- دمای همگن شدگی در سیال‌های درگیر مورد توجه است دو دسته شدن سیال‌ها براساس داده‌های دما و شوری است که نقش فرآیند آمیختگی سیال با دما و شوری بالا (به احتمال بسیار ماگمایی) با سیال‌های جوی با دما و شوری پایین‌تر را در تشکیل ذخیره معدنی نشان می‌دهد. کمپلکس‌های بی‌سولفیدی در کانسارهایی که دماهای پایین‌تر از ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد تشکیل می‌شوند و یا در کانسارهایی که کانی‌شناسی آن‌ها نشانگر شرایط احیاء کننده است، غالب هستند. این در حالی است که در کانسارهایی که دماهای بالاتر از ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد تشکیل می‌شوند و یا کانسارهایی که کانی‌شناسی آن‌ها بیانگر شرایط اکسیدکننده است، کمپلکس‌های کلریدی غلبه دارند [۱۸]. دمای تشکیل کمتر از ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد در منطقه اکتشافی زردکوه نشان‌دهنده غالب بودن کمپلکس‌های بی سولفیدی و کم اهمیت بودن کمپلکس‌های کلریدی است (شکل ۹).

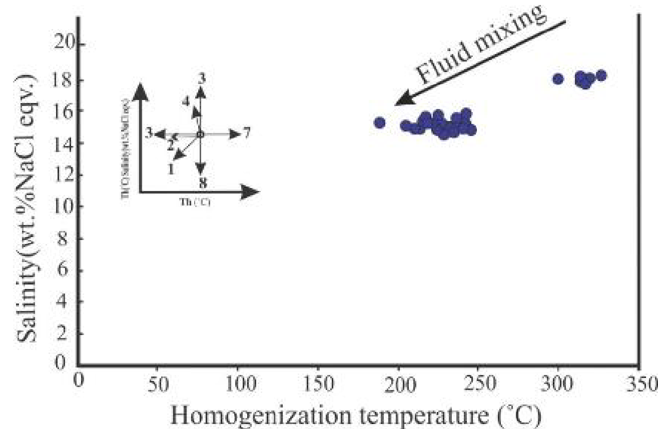
از آنجا که تغییر چگالی در شناسایی سازوکار جریان سیال و تغییر مکانی آن در یک سامانه گرمابی بسیار مهم است، در منطقه مورد بررسی، چگالی سیال نیز تعیین شد. برای این منظور نمودار دمای همگن شدگی- شوری رسم گردید. بر اساس این نمودار به همراه خطوط پربندی با چگالی ثابت، می‌توان چگالی سیال را تعیین کرد [۱۹]. بر این اساس، سیال‌های درگیر منطقه دارای چگالی ۰٫۸۶ تا ۰٫۸۷ گرم بر سانتیمتر مکعب، با بیشترین فراوانی در حدود ۰٫۸۷ گرم بر سانتیمتر مکعب هستند. بر پایه نظر ویلکینسون [۲۰]، سردشدگی اهمیت ناچیزی در ته‌نشست مقادیر قابل‌توجهی از مواد معدنی در یک حجم از سنگ، به سبب نبود شیب زمین‌گرمایی زیاد در محیط‌های پوسته‌ای دارد. با این وجود، چنان که در شکل نشان داده شده است، کاهش دمای همگن‌شدگی از ۳۶۵ به ۱۸۸ درجه سانتی‌گراد، سبب افزایش چگالی سامانه از ۰٫۸۶ به ۰٫۸۷ گرم بر سانتی‌متر مکعب، کاهش سرعت سیال کانسنگ ساز و سرانجام تمرکز و نهشت ماده معدنی می‌شود. تغییرات دمایی به علت دور شدن سیال‌ها از مرکز سامانه، کانال کشی شدن آن‌ها در مسیرهای گسل، آمیختگی با آب‌های سرد جوی و رقیق شدن است. روندهای سردشدگی و رقیق‌شدگی عمومی در این گستره نشان‌دهنده ورود آب سرد سطحی به درون سامانه بوده که سبب ایجاد حالت تلسکوپی در آن شده است. این پدیده با حضور میان بارهای سیال ثانویه با دماها و شوری‌های پایین‌تر مشخص می‌شود.

برای تعیین عمق و فشار تشکیل کانی‌سازی زردکوه از داده‌های دما و شوری استفاده گردید [۲۱]. فشار و عمق سیال گرمابی دو عاملی هستند که سبب درک شرایط تشکیل کانسار و همچنین تکامل سیال گرمابی می‌شوند. براساس شکل۱۰ و با توجه به گستره دمایی و شوری منطقه زردکوه، این کانی‌سازی در فشار ۲۰ تا ۳۰ مگاپاسکال و در عمق۱۳۰۰ متر (براساس فشار سنگ ایستایی) رخ داده است.

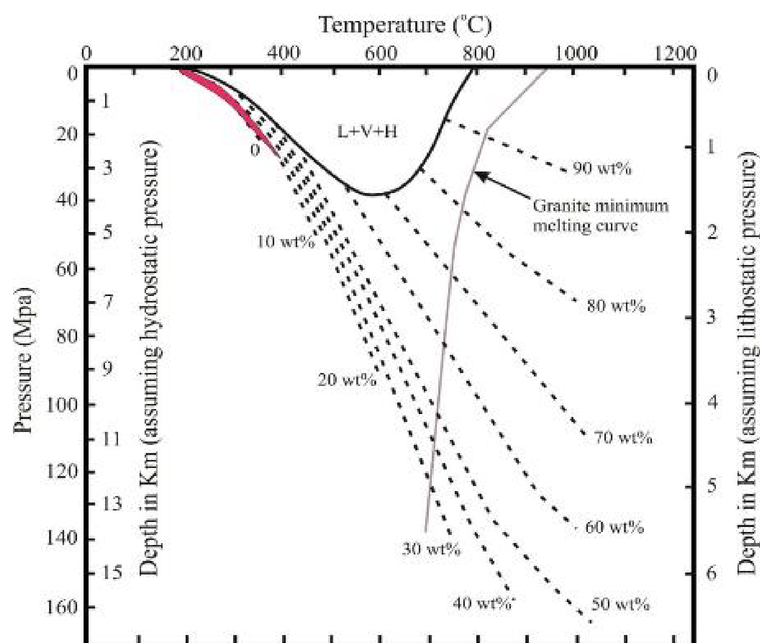
مدل کانی‌سازی

کانسارهای مس پورفیری به کانسارهایی با تناژ بالا، عیار پایین، غیرهمزاد و درون‌زاد گفته می‌شود و ارزش‌های معدن‌کاری بزرگ‌مقیاس قابل بهره‌برداری هستند [۲۲]. نخستین کانساری که با عیار کم و به صورت روباز بهره‌برداری شد، کانسار مس پورفیری بینگهام (ایالت یوتای آمریکا) در سال ۱۹۰۶ بود [۲۳]. بیشتر ذخایر پورفیری کشف شده وابسته به دوران دوم و سوم بوده که در کمربندهای زمین ساختی کرانه اقیانوس آرام واقع هستند [۲۴]. کانسارهای مس پورفیری بر پایه موقعیت زمین ساختی و سنگ همراه به دو گروه تقسیم می‌شوند. گروه اول کانسارهای مس پورفیری نوع مونزونیتی هستند که همراه با سنگ‌های مونزونیتی و گرانودیوریتی پورفیری آهکی قلیایی واقع در کمربندهای زمین ساختی پهنه فرورانش کرانه قاره‌ها کشف شده‌اند [۲۵]. توده‌های نفوذی نیمه عمیق استوک و گاهی دایک و به ندرت باتولیت را بیشتر تشکیل می‌دهند. ماگمای آهکی قلیایی ناشی از ذوب بخشی پوسته اقیانوسی منطقه پهنه فرورانش، طی بالاآمدن، به دلیل آغشتگی با

سنگ‌های مسیر، تغییراتی در ترکیب شیمیایی آن رخ می‌دهد. از این رو، مقدار سیلیس، عناصر قلیایی و مولیبدن کانسارهای مس پورفیری در کرانه قاره‌ها بیشتر از جزایر قوسی بوده و به عکس، مقدار طلای کانسارهای جزایر قوسی بیشتر است [۲۶].



شکل ۹ نمودار شوری نسبت به دمای همگن‌شدگی سیال‌های درگیر منطقه زردکوه که آمیختگی را نشان می‌دهد. روندهای ممکن تکامل سیال در نمودار دما-شوری: روند ۱= آمیختگی سیال A با سیال سردتر و شوری کمتر B، روندهای ۲ و ۳= آمیختگی سیال A با سیال های درگیر با شوری‌های مختلف ولی دمای یکسان، روند ۴= شوری فاز باقیمانده در اثر جوشش افزایش یافته است، روند ۵= سردشدگی سیال، روند ۶= باریک شدگی سیال های درگیر، روند ۷= تراوش سیال های درگیر طی گرمایش [۱۲].



شکل ۱۰ نمودار فشار- دما نشان‌دهنده رابطه فازها در سامانه H_2O-NaCl در فشارهای ایستابی و سنگ ایستایی که منطقه زردکوه در آن مشخص شده است [۱۴]، (L = مایع، V =بخار، H = هالیت). خطچین‌ها پربندهای ثابت درصد وزنی NaCl محلول در شورابه هستند. خط باریک خاکستری منحنی کمترین ذوب گرانیت و خط ضخیم مشکی مرز سه فازی، L+V+H را برای سامانه NaCl-KCl-H_2O با Na/K در محلول ثابت شده بوسیله آلبیت و فلدسپار قلیایی در دماهای مشخص نشان می‌دهد.

گروه دوم کانسارهای مس پورفیری نوع دیوریتی هستند که همراه با سنگ‌های دیوریتی-تونالیتی آهکی قلیایی در کمربندهای پهنه فرورانش جزایر قوسی کشف می‌شوند [۲۶]. فراورده جانبی این کانسارها طلا و برای نوع مونزونیتی مولیبدن است [۲۷]. عیار طلا در نوع دیوریتی به طور متوسط ۰/۵ گرم در تن است، در صورتیکه برای نوع مونزونیتی به ندرت به ۰/۲

[DOR: 20.1001.1.17263689.1401.30.4.9.9]
[DOI: 10.52547/ijcm.30.4.697]

گرم در تن می‌رسد. طلا در این کانسارها همراه با کالکوپیریت بوده و به ندرت به صورت آزاد یافت شده است [۲۸]. در نوع دیوریتی، مقدار منیزیم، آهن و کلسیم محلول افزایش یافته ولی مقدار سیلیس، پتاسیم و گوگرد کاهش می‌یابد. به دلیل پایین بودن مقدار سولفیدها، پهنه کوارتز-سریسیت-پیریت در نوع دیوریتی به نسبت محدود است، در سامانه نوع دیوریتی، بیشتر دو پهنه پتاسیمی و پروپیلیتی یافت می‌شوند و ذخیره در این دو پهنه است. بالا بودن مقدار مگنتیت و انیدریت، دلیل بر بالا بودن اکسیژن محلول ماگمایی است [۲۹]. ذخایر مس پورفیری که از مولیبدن، ماگمای اسیدی‌تر و ذخایر مس پورفیری غنی از طلا، ماگمای مافیک‌تری دارند [۳۰]. الگوی منطقه‌بندی دگرسانی-کانی‌سازی در مرکز کانسارهای مس پورفیری، از پایین به سمت بالای سامانه شامل سدیمی، کلسیت، پتاسیمی، کلریت، سریسیت، سرسیتیک و آرژیلیک پیشرفته است. دگرسانی‌های پروپیلیتی در سطوح عمیق‌تر و کلریت در عمق کمتر نیز در فواصل دورتر گسترش می‌یابند. دگرسانی‌های سرسیتیک و به ویژه آرژیلیک پیشرفته در کانسارهای مس پورفیری همراه با سنگ‌های قلیایی، نسبت به کانسارهای همراه سنگ‌های آهکی قلیایی گسترش کمتری دارند [۳۱].

منطقه زردکوه براساس نوع دگرسانی‌های آرژیلیک، پروپلیتیک و گسترش وسیع آنها شبیه سامانه‌های پورفیری است. با توجه به نبود رخنمون پهنه پتاسیمی و محدود بودن پهنه کوارتز-سریسیت-پیریت در سطح، می‌توان گفت که سطح فرسایش در منطقه بالاست. اسیدشویی در Eh اکسایشی و pH کاملا اسیدی منطقه گسترش یافته و باعث شکل‌گیری پهنه-های اسید-سولفات و گوسان شده که در سامانه‌های مس پورفیری رایج است.

بر پایه نمودار شوری نسبت به دمای همگن‌شدگی سیال های درگیر، سردشدگی سیال ناشی از کاهش دما عامل اصلی کانی‌سازی است. افت دما نیز سبب ناپایداری کمپلکس‌های حمل‌کننده عناصر و ته‌نشست کانی‌ها می‌گردد و نبود فاز جامد (هالیت) در سیال های درگیر به دلیل شوری متوسط تا پایین سیال‌های کانه‌ساز است. طیف دمایی به‌دست آمده از این مرحله با سامانه‌های پورفیری قابل مقایسه است. در سامانه‌های پورفیری، دمایی از ۲۰۰ تا ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد و شوری از صفر تا ۷۰ درصد وزنی معادل نمک طعام متغیر است [۲۰].

براساس نمودار فورنیر [۲۱] و با توجه به دما و شوری، میانگین عمق کانی‌سازی حدود ۱۳۰۰ متر برآورد شد (شکل۱۰) که بیشتر از عمق تشکیل کانسارهای فراگرمایی است [۳۲]. شواهد کانی سازی و دگرسانی و عمق تشکیل کانسار زردکوه میتوانند گویای کانی سازی در ارتباط با یک سامانه پورفیری باشد که تاکنون در شرق ایران کمتر شناسایی و یا بررسی شده است.

برداشت

دگرسانی‌ها در منطقه زردکوه دارای الگویی با تمرکز نسبی در گستره کانسار هستند، به طوری که دگرسانی سیلیسی، کوارتز-سریسیت-پیریت به صورت محدود در منطقه و آرژیلیک در مرکز سامانه و دگرسانی پروپلیتیک پیرامون و در لبه بخش اصلی رخ داده‌اند. طرح پهنه‌بندی دگرسانی‌ها در منطقه مورد بررسی شبیه سامانه‌های پورفیری است. حضور و نفوذ توده نیمه‌عمیق پیروکسن دیوریت تا مونزودیوریت موجب کانی‌سازی در منطقه شده است. این کانه‌زایی در منطقه زردکوه طی فرایندهای بعدی در معرض گسل‌های رورانندگی قرارگرفته و بسیاری از ساخت‌ها و بافت‌های اولیه آن از بین رفته و یا تغییر کرده و ساخت و بافت‌های ناشی از دگرشکلی در آن به وجود آمده‌است. بر اساس نتایج دماسنجی در منطقه، دمای سیال درگیر ۱۸۸ تا ۳۶۵ درجه سانتی‌گراد است، رگچه‌های دمای بالاتر که شوری بالاتر نیز دارند، اغلب توسط سیال‌های ماگمایی ایجاد شده‌اند و رگچه‌های دمای پایین تر و با شوری کمتر می-توانند نشان‌دهنده اثر بیشتر سیال‌های جوی باشد. باتوجه به شواهد بیان شده، می‌توان منطقه اکتشافی زردکوه را بخش پسین یک سامانه پورفیری در نظر گرفت نتایج بدست آمده از بررسی‌های کانی‌سازی و زمین شیمیایی نشان می‌دهند که منطقه زردکوه با توجه به ویژگی‌های سنگ شناسی، دگرسانی، کانی‌سازی و زمین شیمی، یک منطقه کاملا امید بخش معدنی است که در آینده می‌تواند جایگاه بسیار ارزشمندی در معادن فعال استان سیستان و بلوچستان داشته باشد.

قدردانی

این پژوهش با پشتیبانی مالی دانشگاه فردوسی مشهد در ارتباط با طرح پژوهشی شماره ۳/۵۳۹۷۰ مورخ ۱۳۹۹/۱۱/۲۹ انجام شده است. نگارندگان از آقای مهندس عبدالرضا خوش‌نظر

[DOR: 20.1001.1.17263689.1401.30.4.9.9]
[DOI: 10.52547/ijcm.30.4.697]

مدیر پروژه اکتشافی منطقه زردکوه شرکت وستا تجارت فرنام برای در اختیار گذاشتن امکانات لازم برای انجام این پژوهش و همچنین از آقایان مهندس محسن هیبت‌نژاد و مهندس سجاد فرهادی برای کمک در اجرای عملیات صحرایی سپاس گزارند.

مراجع

[1] Aghanabati S. A., *"Geology of Iran (in Persian)"*, Geological Survey of Iran, Tehran (2004) 586pp.

[2] Delkhah M., *"Geochemistry and petrology of igneous rocks in the middle of Zardkooh region, southeast of Iranshahr (in Persian)"*, M.Sc. Thesis, The University of Sistan and Baluchestan (2020).

[3] Maanijo M., *"Geochemistry, Understanding the Origin of Mineralizing Fluids and the Formation of Chehel koureh Copper Ore (Northwest of Zahedan) (in Persian)"*, PhD Thesis, Shahid Beheshti University (2007).

[4] Niknam Sh., Bomeri M., Biyabangard H., Nahtayi, A., *"Identification of alteration zones in Lonca region using telemetry methods (in Persian)"*, Iranian Economic Geological Society Conference (2015).

[5] Mokhtari Z., Boumari M., Bagheri S., *"Investigation of porphyry gold and copper mineralization using petrographic evidence and alteration in Siah Jangal region, north of Taftan mountain (in Persian)"*, southeast of Iran, 6th conference of Iranian Economic Geological Society (2014) 32-56.

[6] Noura A., *"Alteration Zones and Economic Geology of Kharestan Region in Relation to Copper and Gold Mineralization (in Persian)"*, M.Sc. Thesis, Azad University (2007).

[7] Moradi R., bomeri M., Bagheri S., Zahedi A., *"Determination of physicochemical conditions and controlling factors of mineralization using mineralogy, paragenetic relations and fluid loads in Stibnite-Shorchah gold deposit, southeast of Zahedan (in Persian)"*, Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy, 23 (2015) 121-134.

[8] Delavari M., Amini S., Sakani A., *"Geochemistry and tectonic-magmatic origin of Tertiary igneous rocks in the east and northeast of Nehbandan, eastern Iran (in Persian)"*, Journal of Earth Sciences, 90 (2013) 98-121.

[9] Mirblochezhi H., Biabangard H., Bomeri M., *"Petrology, geochemistry and origin of granite rocks of Garagheh mountain, northwest of Zahedan (in Persian)"*, Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy, 29 (2021) 237-248.

[10] Moradi R., bomeri M., Bagheri, S., *"Investigation of Apatite Chemistry in Azarin Lar Complex, North of Zahedan (in Persian)"*, Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy, 27 (2019) 281-298.

[11] Eftekharnejad J., Mahdavi A., Sahandi M., Samadian R., *" Geological map of one hundred and fifty thousand Nikshahr"*, Geological Survey of Iran (1988).

[12] Darvishzadeh A., *"Geology of Iran (in Persian)"*, Amirkabir Publications, Tehran (2015) 242pp.

[13] Steele-MacInnis M., Lecumberri-Sanchez P., Bodnar R.J., *"Short note: HokieFlincs_H_2O-NaCl: A Microsoft Excel spreadsheet for interpreting microthermometric data from fluid inclusions based on the PVTX properties of H2O-NaCl"*, Computers and Geosciences, 49 (2012) 334-337.

[14] Lecumberri-Sanchez P., Steele-MacInnis M., Bodnar R.J., *"A numerical model to estimate trapping conditions of fluid inclusions that homogenize by halite disappearance"*, Geochimica et Cosmochimica, Acta, 92 (2012) 14-22.

[15] Whitney D.L., Evans, B.W., *"Abbreviations for names of rock-forming minerals"*, American Mineralogist 95 (2010), 185-187.

[16] Stoffregen R.E., *"Genesis of acid-sulfate alteration and Au-Cu-Ag mineralization at Summitville "*, Economic Geology, 82 (1987), 1575-1591.

[17] Hajalilou B., Aghazadeh M., *"Geological, Alteration and Mineralization Characteristics of Ali Javad Porphyry Cu-Au Deposit, Arasbaran Zone, NW Iran"*, Open Journal of Geology, 6 (2016) 859-874.

[18] Seward T.M., *"Thio complexes of gold and the transport of gold in hydrothermal ore solutions"*, Geochimica et Cosmochimica Acta, 37 (1973) 379-399.

[19] Bodnar R.J., *"A method of calculating fluid inclusion volumes based on vapor bubble diameters and PVTX properties of inclusion fluids"*, Economic Geology, 78 (1983) 535-542.

[20] Wilkinson J.J., *"Fluid inclusions in hydrothermal ore deposits"*, Lithos 55 (2001) 229-272.

[21] Fournier R.O., *"Hydrothermal processes related to movement of fluid from plastic into*

[DOR: 20.1001.1.17263689.1401.30.4.9.9]

[DOI: 10.52547/ijcm.30.4.697]

brittle rock in the magmatic-epithermal environment", Economic Geology 94 (1996), 1193-1212.

[22] John D.A., Ayuso R.A., Barton M.D., Blakely R, J., Bodnar R.J., Dilles J.H., Gray E., Graybeal F.T., Mars J.C., Mcphee D.K., Seal R.R ., Taylor R.D., Vikre P.G.,. *"Porphyry copper deposit model, chap. B of mineral deposit models for resource assessment"*. United States Geological Survey Scientific Investigations, Report 5070-B (2010), 169pp.

[23] Parson A.B., *"The porphyry copper"*, American Institute of mining and Metallurgical Engineers, New York, (1993), 581 pp.

[24] Bin X., Genwe C., He W., *"Analysis of Tectonic Settings of Global Super large Porphyry Copper Deposits"*, Science in Chine, (2003), 46pp.

[25] Cooke d.R., Heithersay P.S., Wolfe R., Culderon A.L., *"Australian and Western Pacific Porphyry Cu-Au deposits"*, Journal of Australian Geology and Geo Physics, 17 (1998), 97-104.

[26] Georgive G., *"A genetic model of the Elatsite Porphyry Copper Deposit"*, Bulgaria Geochemistry, Mineralogy and Petrology, 46 (2008), 143-160.

[27] Lowell J.D., Guilbert J.m., *"Lateral and Vertical alteration-mineralization zoning in porphyry ore deposits in North Sulawesi, Indonesia"*. Economic Geology, 70 (1970), 628-644.

[28] Kesler S.E., Chryssoulis S.L., Simoon C., *"Gold in porphyry copper deposits: its abundance and fate"*. Ore Geology Reviews, 21(2002), 103-124.

[29] Seal R.R., *"Geological and Environmental Characteristics of porphyry copper Deposits with Emphasis on Potential future Development in the Bristol Bay watershed"*, Alaska. United States Geological Survey, Virginia, (2012), 30pp.

[30] Kosaka K., Wakita K., *"Some geological features of the Mamut porphyry copper deposit, Sabah, Malaysia",* Economic geology, 73 (1978), 618-627.

[31] Sillitoe R.H., *"Some metallogenic features of gold and copper deposits related to alkaline rocks and consequences for exploration"*, Mineralium Deposits, 37 (2002), 4-38.

[32] Hedenquist J.W., *"Mineralization associates with volcanic related hydrothermal systems in the Circum-Pacific basin In: M.K. Horn (Editor), Transactions of the Fourth Cricum-Pacific"*, Energy and Mineral Resources Conference, American Associated of Petroleum Geologists, Tulsa (1987), 513-524.